

О МОДЕЛИРОВАНИИ В ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА В РОЛИКАХ ШИРОКОПОЛОЧНЫХ ДЕТАЛЕЙ С ПРОДОЛЬНОЙ КРИВИЗНОЙ

В.А. Марковцев, М.В. Илюшкин, Н.А. Шмельков, В.И. Филимонов

Приведены математические модели потери устойчивости и определения силовых параметров процесса гибки широкополочных профилей на ребро в закрытых роликовых калибрах с раскаткой на клин, используемые при разработке технологии производства кольцевых деталей

Широкополочные детали с продольной кривизной находят широкое применение в автомобилестроении (бамперы автомобилей), дорожном строительстве (ограждения), металлургии (обручи-вставки для упаковки и транспортировки рулонного тонколистового проката) [1, 2]. До недавнего времени такие детали изготавливали штамповкой или же применяли профилирование с последующим приданием профилю продольной кривизны в штампе. Эти технологии требуют значительных затрат на технологическую подготовку производства и изготовление деталей.

Более выгодными являются технологии производства таких деталей в роликах, которые можно классифицировать согласно рис. 1. Изготовление деталей в профилировочных машинах с одновременным формированием продольной кривизны (блок 1) предусматривает формообразование сечения профиля при обеспечении условий направленного воздействия на очаг деформации для получения требуемой кривизны детали. Так, приложение вращающего момента со стороны правильного устройства к профилю, выходящему из последней пары формирующих роликов станка (блок 1.2), позволяет воздействовать на очаг деформации и получить требуемую кривизну детали. По данной технологии, разработанной в ОАО «Ульяновский НИАТ», производят бамперы автомобиля ВАЗ-06 (рис. 2,а) [1] и стеклоподъемники автомобилей семейства УАЗ [2]. Выбором формы оси профилирования (блок 1.2) профилю можно придать относи-

тельно небольшую кривизну на станках с нерегулируемыми по высоте нижними валами, поскольку изменение формы оси профилирования в данном случае осуществляется за счет выбора диаметров формирующих роликов. Здесь существенным ограничением является скоростной режим процесса формообразования профиля. Регулируемые нижние валы профилировочного станка предоставляют более широкие возможности обеспечения кривизны изготавливаемой детали. Форму линии профилирования, как правило, изменяют лишь в вертикальной плоскости. В принципе, для придания профилю саблевидности можно изменять форму оси профилирования и в горизонтальной плоскости, однако весьма часто это приводит к неудовлетворительному качеству поверхности профиля и потере устойчивости его элементов. Более целесообразным является дифференцированный обжим донной части профиля по ширине его донной части. Изменением формы линии профилирования изготавливают профиль дорожного ограждения с заданной небольшой продольной кривизной (рис. 2,б). Профиль дорожного ограждения с большой кривизной получают профилированием с последующей гибкой в трех-роликовых гибочных машинах (блок 2). Широкополочные профили с продольной кривизной целесообразно изготавливать с дифференцированным (локальным) обжимом определенных участков заготовки (блок 1.3). По такому способу изготавливают бампер автомобиля ВАЗ-07 (рис. 2,в) [2]. Что касается производства деталей с большой кривизной или кольцевых деталей (рис. 2,г), то профили открытого сечения с высотой до 60 мм могут изготавливаться по совмещенной схеме локальным обжимом в роликах последнего перехода профилировочного станка, а крупногабаритные детали после формообразования сечения требуют дополнительной операции деформирования на гибочно-раскатном станке (блок 3). Это связано, в основном, с техническими вопросами отвода профиля и его разрезки на мерные длины, а также технологическими возможностями профилировочных станков (ограничения по высоте формируемого профиля).

Последний из рассмотренных способов изготовления кольцевых деталей был использован для разработки технологии изготовления из стальной ленты

упаковочного обруча трех типоразмеров по сечению (50x50x2,5 мм, 60x40x2,5 мм и 100x70x2 мм). Попытка использования трех-точечной гибки привела к отрицательным результатам: боковая полка теряла устойчивость в форме кромковой волнистости даже при радиусе кривизны, превышающем в восемь раз заданный радиус. Ниже рассматриваются результаты моделирования процесса и отработки технологии производства «обруча упаковочного» из уголкового профиля 100x70x2 мм, поскольку он наиболее подвержен локальной потере устойчивости при деформировании из-за значительных размеров полок.

Рассмотрим первоначально гибку на ребро уголкового профиля, в котором ребром является полка меньшей ширины. Пусть радиус изгиба в плоскости этой полки шириной H будет R . Для определения окружных деформаций необходимо знать положение центра масс сечения, по крайней мере, в направлении радиуса изгиба. Положим, что при изгибе профиля полка удерживается от бокового смещения. Положение центра масс сечения вдоль радиуса изгиба с отсчетом от внешней поверхности широкой полки легко определить:

$$h = \left(\frac{4 \cdot s [b - (r + s_0)] + 4 \cdot [H^2 - (r + s_0)^2] + \pi \cdot (2 \cdot r + s_0) \cdot [(2 \cdot r + s_0) \cdot (1 - \cos \alpha) + s_0]}{8 \cdot b + 8 \cdot H - 16 \cdot (r + s_0) + 2 \cdot \pi \cdot (2 \cdot r + s_0)} \right), \quad (1)$$

где s_0 – толщина стенки профиля; b , H – ширина полок ($b > H$); r – радиус сопряжения полок по внутреннему контуру зоны изгиба; α – угол между полками профиля (здесь $\alpha = \pi/2$).

Максимальные окружные деформации для зон растяжения и сжатия определяются соответственно формулами:

$$e_{\theta}^p = \ln \left(\frac{R + H}{R + h} \right), \quad e_{\theta}^c = \ln \left(\frac{R}{R + h} \right), \quad (2)$$

где h определяется соотношением (1).

Однако при изгибе пластически деформируется лишь угловая зона, а перпендикулярная плоскости изгиба полка шириной b теряет устойчивость в форме кромковой волнистости.

Критические деформации потери устойчивости полки можно определить, используя формулу [3]:

$$e^{cr} = \left[(k^* \cdot \lambda)^2 \cdot \frac{n \cdot E}{K} \cdot \left(\frac{s}{b - b_h} \right)^4 \right]^{\frac{1}{n+1}}, \quad \lambda = \frac{\pi^2}{12 \cdot (1 - \mu^2)}, \quad (3)$$

где k^* – коэффициент, учитывающий условия закрепления краев полки; E , μ – модуль Юнга и коэффициент Пуассона соответственно; b , b_h – ширина полки и координата центра тяжести сечения профиля в плоскости, перпендикулярной плоскости изгиба, соответственно; K , n – параметры упрочнения материала заготовки.

Соотношение (3) дает выражение предельной деформации в закритической области, а потому $\mu = 0,5$. Коэффициент k^* , учитывающий условия закрепления краев полок (один край зашпелен, другой – свободен), принято брать равным 3,6 [4].

Радиус кривизны, соответствующий условию отсутствия кромковой волнистости, можно определить на основе формул (2) и (3):

$$R \leq \frac{h \cdot \exp(e^{cr})}{1 - \exp(e^{cr})}. \quad (4)$$

С использованием формул (2) – (4) в среде MathCad построены кривые (рис. 3), представляющие критическую деформацию и окружные деформации угловой зоны, на основе которых можно определить предельный радиус детали при различных значениях высоты полки, перпендикулярной плоскости изгиба. В частности, для ширины полки $b = 100$ мм предельный радиус изгиба составляет около 6 м, а для меньших радиусов характерна потеря устойчивости в форме кромковой волнистости (рис. 4,а). В этой связи была предпринята попытка получения меньшего радиуса изгиба путем удержания обеих полок от депланаций. В этом случае, полка, перпендикулярная к плоскости изгиба, испытывает локальную потерю устойчивости в форме выпучивания участка, прилегающего к угловой зоне. Дальнейшее уменьшение радиуса кривизны приводит к разрушению заготовки по зоне сгиба (рис. 4,б).

С другой стороны, в закритической области значение окружной деформации угловой части профиля может быть связано с параметрами кромковой волнистости, которая может быть описана в терминах отклонений $w(r, z)$ материальных частиц участков полки от плоскости пластически недеформированных участков по закону [2]:

$$w(r, z) = f \cdot \frac{r - r_n}{b - r_n} \cdot \sin \frac{m \cdot \pi \cdot R \cdot \varphi}{a}, \quad (5)$$

где f – амплитуда волны на кромке; r – текущая координата, отсчитываемая по нормали от зоны сгиба к кромке; r_n – ширина участка полки, не подверженно-го кромковой волнистости; m – число полуволн при потере устойчивости; φ – текущий угол, измеряемый в плоскости изгиба.

При потере устойчивости полки ее продольная деформация может быть подсчитана а posteriori, если измерить амплитуду и шаг волны на кромке. В этом случае в формуле (5) следует положить $r = b$ и $m = 2$, а затем с использованием функции $w(r, z)$ произвести спрямление волны, которое после несложных, но громоздких вычислений приводит к следующему выражению:

$$J = \frac{2 \cdot a}{\pi} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot f}{a}\right)^2} \cdot E\left(\frac{\pi}{2}, p\right), \quad (6)$$

где J – длина синусоиды на ее периоде; $E(\pi/2, p)$ – эллиптический интеграл второго рода при $0 < p^2 < 1$.

В формуле (6) параметр p определяется соотношением:

$$p = \sqrt{\frac{2 \cdot f^2 \cdot \pi^2}{a^2 + 2 \cdot f^2 \cdot \pi^2}}.$$

Зависимость продольной деформации кромки, вычисленной на основе выражения (6), от амплитуды и шага волны представлена на рис. 5 в результате расчетов в среде MathCAD. К сожалению, данная модель не дает возможности определения параметров кромковой волнистости, если известна продольная (окружная) деформация угловой зоны профиля. Однако обратная процедура

оказывается вполне возможной, поскольку параметры кромковой волнистости могут быть получены путем непосредственного их замера на детали, подверженной этому виду потери устойчивости. Сравнение полученного значения деформации с деформацией, определяемой по рис. 4, дает возможность оценки точности предлагаемой модели. Например, при $R = 3$ м были получены параметры кромковой волнистости $a = 140$ мм, $2f = 6$ мм. Значения деформаций по рис. 4 ($b = 100$ мм) и по рис. 5 отличаются не более чем на 6 %.

Получение детали «обруча упаковочного» без дефектов типа кромковой волнистости возможно путем дифференцированного обжима в конических роликах (рис. 6) полки, лежащей в плоскости изгиба. При этом возникает вопрос выбора из числа существующих или разработки специализированного раскатного станка на основании требуемых значений силовых факторов: силы распора в роликах и крутящего момента.

Для определения силовых факторов процесса раскатки рассмотрим элемент раскатываемой полки единичной ширины в направлении радиусагиба R кольца. Будем считать величину обжима элемента постоянной в направлении R . На данный элемент действует нормальное напряжение p со стороны роликов с величиной приведенного радиуса

$$R_{np} = \frac{2 \cdot R_n \cdot R_v}{R_n + R_v}, \quad (7)$$

где R_n , R_v – радиус нижнего и верхнего раскатного ролика соответственно.

Уравнение равновесия для данного элемента в условиях отсутствия уширения заготовки имеет вид:

$$s \cdot d\sigma_\theta + \left[\sigma_\theta + p \cdot \left(1 + \frac{f}{\operatorname{tg}(\alpha)} \right) \right] \cdot ds = 0 \quad (8)$$

где s – текущее значение толщины сжимаемого элемента; σ_θ – напряжение в тангенциальном направлении, расположенное перпендикулярно радиусу R в плоскости заготовки; f – коэффициент трения между заготовкой и раскатными

роликами; α – центральный угол раскатного ролика приведенного радиуса, стягиваемый дугой контура контактной зоны заготовки и ролика.

Условие пластичности для выделенного элемента можно записать в следующем виде:

$$\sigma_{\theta} + p = K \cdot \left| \ln \left(\frac{s}{s_0} \right) \right|^n, \quad (9)$$

где K , n – константы упрочнения материала заготовки; s_0 – исходная толщина заготовки.

Подставив значение p из соотношения (9) в уравнение (8), после некоторых преобразований получим:

$$\sigma'_{\theta} - \frac{f}{s} \cdot \sqrt{\left(\frac{R_{np}}{s - s_0} \right)} \cdot \sigma_{\theta} = -\frac{K}{s} \cdot \left| \ln \left(\frac{s}{s_0} \right) \right|^n, \quad (10)$$

где R_{np} определяется соотношением (7).

Уравнение (10) легко приводится к стандартному виду:

$$\sigma'_{\theta} + Q(s) \cdot \sigma_{\theta} = R(s), \quad (11)$$

где $Q(s) = -\frac{f}{s} \cdot \sqrt{\frac{R_{np}}{s - s_0}}$; $R(s) = -\frac{K}{s} \cdot \left| \ln \left(\frac{s}{s_0} \right) \right|^n$.

Линейное дифференциальное уравнение первого порядка (11) имеет общий интеграл:

$$\sigma_{\theta}(s) = e^{-\int Q(s) \cdot ds} \cdot \left[\int R(s) \cdot e^{\int Q(s) \cdot ds} ds + C \right], \quad (12)$$

где C – константа, определяемая из граничных условий.

Решение (12) не может быть представлено в терминах элементарных функций, однако для заданной толщины заготовки оно может быть линеаризовано с помощью пакета MathCAD так, что его конечный вид представляется зависимостью:

$$\sigma_{\theta}(s) = K \cdot e^{2,4 \cdot \left(1 - \frac{s}{s_0} \right)} \cdot \left[4,4 \cdot \left(\frac{s}{s_0} - 1 \right)^2 + C \right]. \quad (13)$$

Удовлетворение граничным условиям в выходном сечении заготовки позволяет преобразовать решение (13) к виду:

$$\sigma_{\theta}(s) = -4,4 \cdot K \cdot \frac{(2 \cdot s_0 - s_{\kappa} - s) \cdot (s - s_{\kappa})}{s_0^2} \cdot e^{2,4 \cdot \left(1 - \frac{s}{s_0}\right)}, \quad (14)$$

где s_{κ} – толщина заготовки в выходном сечении раскатного калибра (зазор в калибре).

Учитывая, что по ширине раскатываемой полки степень обжима различна, точнее, изменяется линейно по ширине полки, представим величину зазора в калибре s_{κ} следующим образом:

$$s_{\kappa}(t) = s_0 - \frac{(s_0 - s_{\kappa})}{H} \cdot t, \quad (15)$$

где t – параметр, определяющий текущее положение точки на раскатываемой полке с отсчетом от зоны сгиба.

Подстановка значения $s_{\kappa}(t)$ из зависимости (15) в решение (14) позволяет определять напряжение σ_{θ} в любой точке очага деформации.

Одним из основных силовых параметров процесса раскатки является сила распора в роликах, которую можно найти интегрированием нормального напряжения p по очагу деформации. Из условия пластичности (9) следует:

$$p = - \left\{ K \cdot \left| \ln \left(\frac{s}{s_0} \right) \right|^n + |\sigma_{\theta}(s)| \right\}. \quad (16)$$

Протяженность участка очага деформации единичной ширины вдоль R дается приближенной формулой:

$$\Delta(t) = \sqrt{R \cdot (s_0 - s_{\kappa}(t)) \cdot \frac{t}{H}}. \quad (17)$$

Для расчета распирающей силы в калибре следует определить максимум значения p в формуле (16). С этой целью нужно продифференцировать соотношение (16) и приравнять правую часть нулю, откуда определяется значение s , соответствующее максимуму p . Подстановка найденного значения s в формулу (16) дает значение $p_{\max}(t)$. Здесь учтена зависимость $s_{\kappa}(t)$ из формулы (15).

Максимальное значение $p_{\max}(t)$ наиболее просто найти средствами пакета MathCAD. Например, при уровне обжима порядка 15 % ($s_k = 1,7$ мм) максимальное значение нормального напряжения достигается при $s_{\max} = 1,8$ мм.

Сила распора P определяется интегрированием $p_{\max}(t)$ по очагу деформации с учетом соотношения (17):

$$P = \int_0^H p_{\max}(t) \cdot \Delta(t) \cdot dt . \quad (18)$$

Расчет по формуле (18) целесообразно также производить численно в среде MathCAD. Для рассматриваемого случая найденное значение распирающей силы составляет величину порядка 55 кН. Что касается крутящего момента на валу, идущего на деформирование при раскатке полки, то он определяется формулой [5]:

$$M_{кр} = 2 \cdot P \cdot \Psi \cdot \sqrt{R_{np} \cdot (s_0 - (s_k)_{cp})} , \quad (19)$$

где Ψ – коэффициент плеча момента; $(s_k)_{cp}$ – среднее значение зазора в калибре.

Значение Ψ в формуле (19), а также другие составляющие суммарного крутящего момента (момент добавочных сил трения, момент при холостом ходе, динамический момент) можно определить на основе методики, приведенной в работе [5]. Приведенные процедуры расчета были использованы при расчете и конструировании раскатного станка (рис. 8,б) в ОАО «Ульяновский НИАТ».

Придание профилю кривизны в раскатном станке обеспечивалось выбором зазора между роликами с его линейным изменением от S_0 у угловой зоны до $(0,6-0,7)S_0$ у торца профиля. При этом применялся калибр закрытого типа, что предотвращало течение металла в поперечном направлении. Раскатываемая полка приобретает максимальное удлинение у торца и минимальное – у угловой зоны. Величина радиуса изгиба регулируется настройкой зазора между раскатными роликами. При отработке технологии проводили экспериментальные исследования деформационной картины раскатываемой полки двумя методами: методом сеток и методом отверстий. Ниже приводятся результаты исследований по свертке уголкового профиля 100x70x2 мм в обруч.

При использовании метода сеток на заготовке, на месте раскатываемой полки, штангенциркулем с шагом 10 мм была нанесена разметка, а после раскатки были сняты замеры параметров сетки (рис. 7,а-б). По ширине раскатываемой полки сетка имела цифровую нумерацию рядов (от 1 до 6), а в окружном направлении – буквенное обозначение (от «а» до «ж»). Измерения по каждой ячейке производили тоекратно по внешним границам и тоекратно по внутренним границам с целью снижения погрешности, связанной с собственной шириной рисок и размытостью их границ после раскатки. Затем данные усредняли, после чего вычисляли деформации по известным формулам. Результаты вычислений приведены в табл. 1, откуда видно, что снижение деформаций к угловой зоне происходит почти по линейному закону.

Таблица 1.
Окружные деформации полки в направлении раскатки

Ряд №	Значение окружных деформаций раскатываемой полки, %							$\epsilon_{\theta\text{ср}}$, %	$\Delta\epsilon_{\theta\text{ср}}$, %
	а	б	в	г	д	е	ж		
1	16	15	16	15	18	15	16	15,8	1,07
2	11	11	10	12	13	13	11	11,6	1,13
3	10	8	8	10	8	11	10	9,3	1,25
4	8	7	6	6	5	8	8	6,8	1,21
5	6	7	3	6	3	6	6	5,3	1,60
6	3	2	3	3	0	3	3	2,4	1,13

Также производили замеры толщины заготовки после раскатки на уровне середины ячеек трех образцов, полученных разрезкой раскатанной полки вдоль радиуса R. В каждой ячейке выполняли пятикратные замеры с помощью микрометра, а затем усредняли результат и заносили его в табл. 2. Затем выполняли расчет деформаций по толщине заготовки.

При пластическом деформировании, как известно, выполняется условие несжимаемости:

$$\epsilon_{\theta} + \epsilon_m + \epsilon_R = 0, \quad (20)$$

где ϵ_R – радиальная деформация.

Деформации по толщине раскатываемой полки

Ряд №	Толщина полки в измеряемых точках образцов по номерам, мм				Деформация по толщине раскатываемой полки $\varepsilon_{нсп}$, %
	1	2	3	Среднее значение	
1	1,68	1,71	1,65	1,68	-16
2	1,76	1,75	1,75	1,75	-12,5
3	1,83	1,83	1,82	1,83	-8,5
4	1,92	1,90	1,87	1,89	-5,5
5	1,92	1,91	1,90	1,91	-4,5
6	1,97	1,96	1,92	1,95	-2,5

Подстановка соответствующих значений деформаций из табл. 1 и табл. 2 в формулу (20) показывает, что радиальная деформация близка к нулю, следовательно, при раскатке полки фактически имеет место плоская деформации, которая обеспечивается закрытым калибром.

При определении деформаций методом отверстий в заготовке на уровне линий сетки были просверлены отверстия диаметром 5 мм, разнесённые на расстояние 25 мм в окружном направлении и с шагом в 10 мм по высоте полки (рис. 7,в,г). Общее число отверстий – 18: по 6 отверстий в каждой из трех зон для повышения достоверности результатов. Обработка данных показала (табл. 3), что в средней части полки окружные деформации примерно на 5 – 7 % (в терминах абсолютных значений) выше, чем те же деформации полки, полученные методом сеток. Что касается деформаций вблизи торца раскатываемой полки, то здесь наблюдается существенное расхождение, которое объясняется специфическим течением металла вблизи отверстия в соответствии с принципом кратчайшей нормали. В целом, как показывает табл. 3, в данном случае говорить об условиях плоской деформации не приходится: в зонах, примыкающих к отверстиям, имеет место объемное деформированное состояние. Отсюда следует, что применение метода отверстий может давать удовлетворительные результаты только в случае, когда толщина заготовки изменяется незначительно.

Деформация отверстий после раскатки

Ряд №	$(D_{\theta})_{\text{ср}}$, мм	$\epsilon_{\theta\text{ср}}$, %	$(D_R)_{\text{ср}}$, мм	$\epsilon_{R\text{ср}}$, %
1	5,3	6	4,2	-16
2	5,7	14	4,9	-2
3	6,0	20	4,9	-2
4	6,1	22	5,2	4
5	5,8	16	4,8	-4
6	5,2	4	4,4	-12

На раскатанной полке были произведены замеры твёрдости ультразвуковым портативным твёрдомером МЕТ-У1 для выяснения степени упрочнения материала заготовки при деформировании. От угловой зоны к торцу полки твердость изменяется монотонно от 160 до 200 единиц НВ, что лишь подтверждает необходимость учета упрочнения при проведении расчетов процесса формообразования детали.

По разработанной технологии изготовлены пилотные партии деталей, которые прошли технический контроль и признаны годными к применению. Оборудование и технология внедрены и эксплуатируются на предприятии заказчика.

Выводы:

1. Производство широкополочных профильных деталей со значительной продольной кривизной целесообразно осуществлять в роликах в два этапа: профилирование заготовки и гибка профиля по контуру с раскаткой периферийных элементов на клин в закрытых калибрах.

2. Разработанная модель потери устойчивости элементов профиля, лежащих вне плоскостигиба, позволяет определить допустимый радиус изгиба при трехточечной схеме гибки. Расхождение экспериментальных и расчетных данных, полученных на основе разработанной модели, не превышает 6 %.

3. Модель раскатки полки позволяет определять силовые параметры процесса (силу распора и крутящий момент), необходимые для выбора или проектирования раскатных станков.

4. Результаты экспериментальных исследований деформаций раскатываемой полки методом сеток показывают, что применение закрытого калибра позволяет осуществлять процесс формообразования в условиях плоской деформации. Применение метода отверстий для изучения деформаций раскатываемой полки приводит к значительным погрешностям из-за возникновения объемного деформированного состояния вблизи отверстий.

5. Измерение твердости раскатываемой полки подтверждает необходимость учета упрочнения при разработке математических моделей процесса.

Литература

1. Филимонов, В.И. Автоматизированная линия изготовления автомобильных бамперов и методика ее создания. / В.А. Марковцев, В.И. Филимонов, С.В. Филимонов // Автомобильная промышленность. – 2005. – № 4. – С. 29-31.

2. Марковцев В.А. Формообразование стесненным изгибом в роликах и правка гнутых тонкостенных профилей / В.А. Марковцев, В.И. Филимонов. – Ульяновск: Изд-во УлГТУ, 2006. – 244 с.

3. Потеря устойчивости и выпучивание конструкций / Под ред. Дж. Томсона и Дж. Ханта. – М.: Наука, 1991. – 424 с.

4. Работнов, Ю.Н. Механика деформируемого твердого тела / Ю.Н. Работнов. – М.: Наука, 1988. – 712 с.

5. Клименко П.Л. Расчет энергосиловых параметров прокатки с применением ЭВМ / П.Л. Клименко. – Днепропетровск: Изд-во ДМУТИ, 1979. – 75 с.

Рисунки

к статье «О моделировании в технологии производства в роликах широкополочных деталей с продольной кривизной» авторов В.А. Марковцева, М.В. Илюшкина, Н.А. Шмелькова, В.И. Филимонова



Рис. 1.

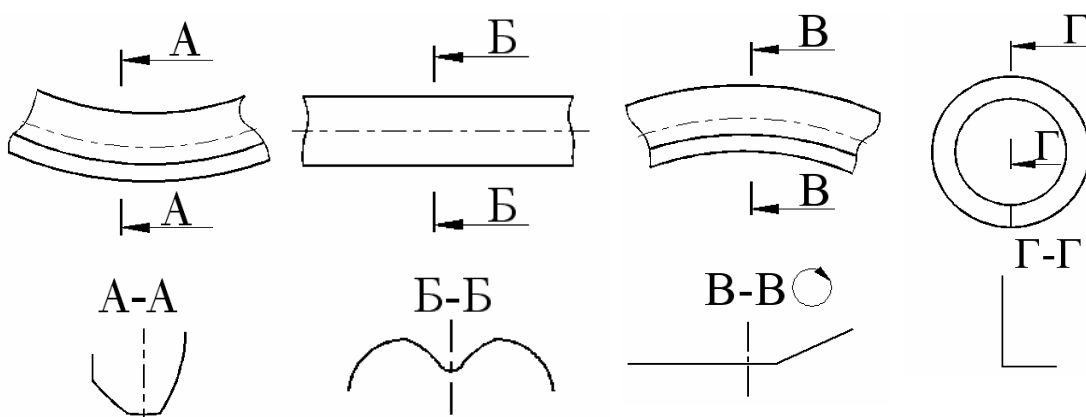


Рис. 2.

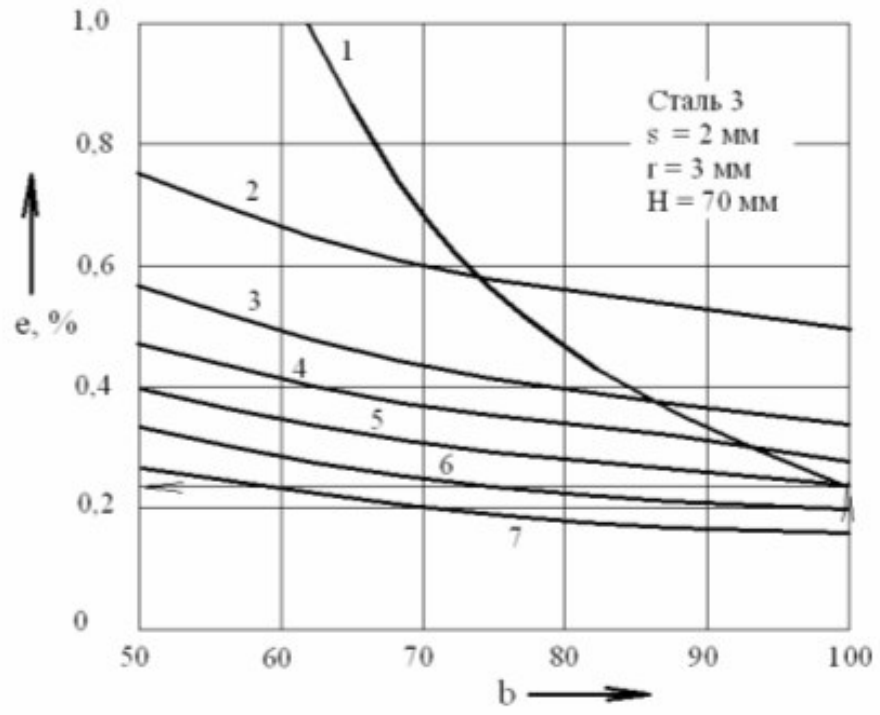


Рис. 3.

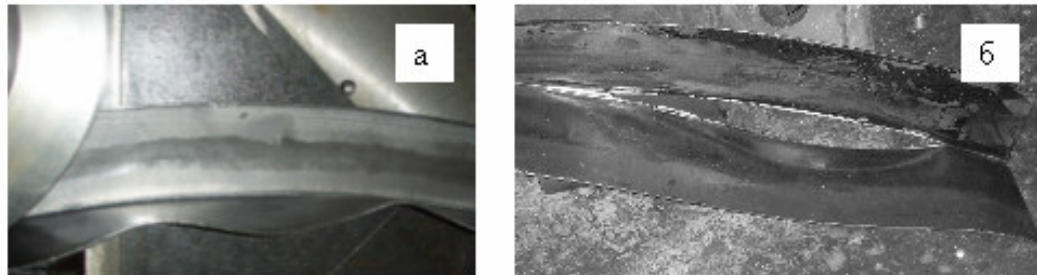


Рис. 4.

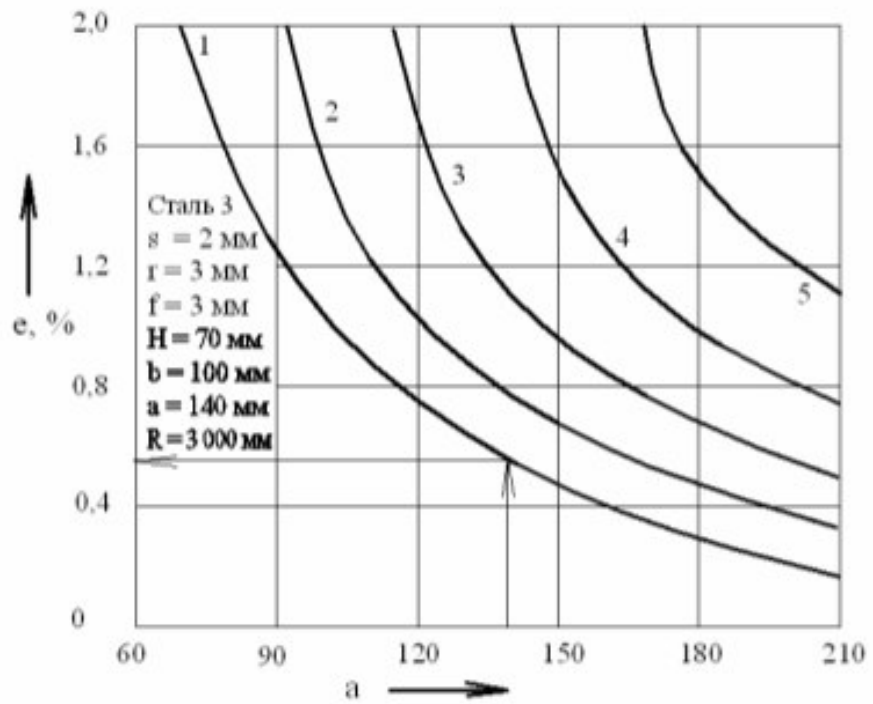
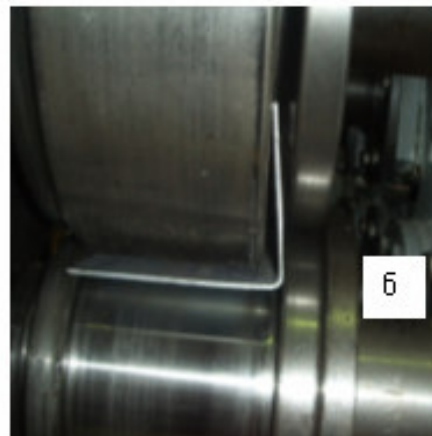
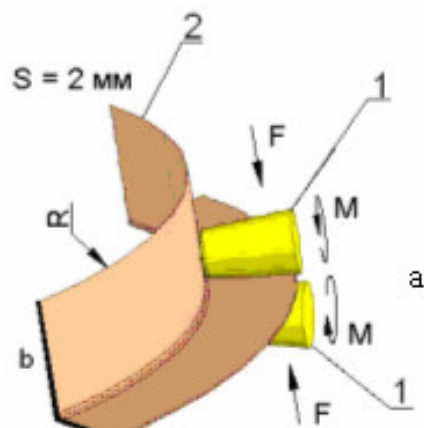


Рис. 5.



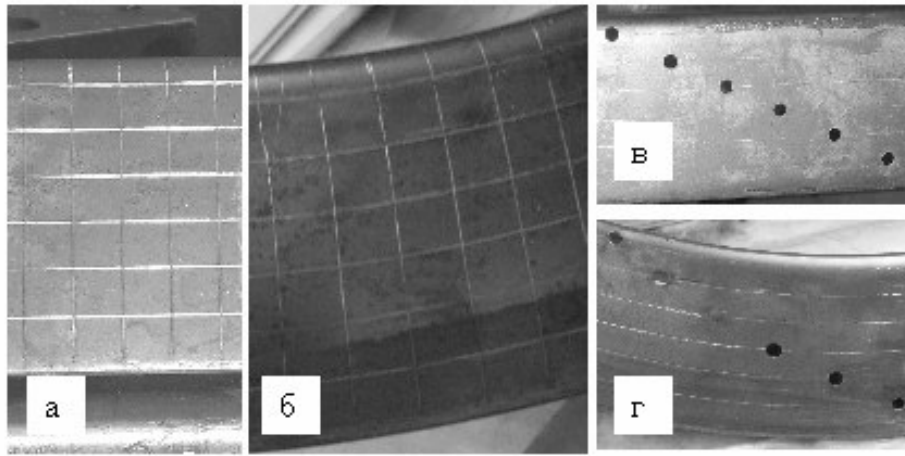


Рис. 7.

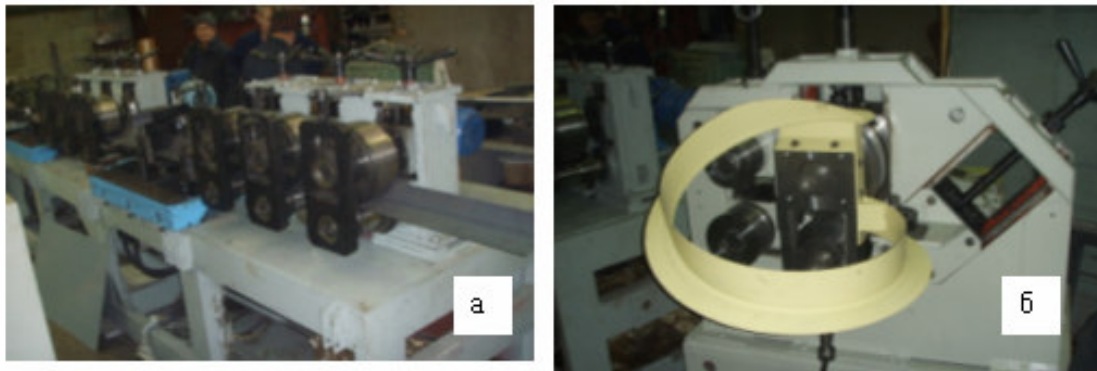


Рис. 8

Подписи к рисункам

статьи «О моделировании в технологии производства в роликах широкополочных деталей с продольной кривизной» авторов В.А. Марковцева, М.В. Илюшкина, Н.А. Шмелькова, В.И. Филимонова

Рис. 1. Классификатор способов изготовления в роликах широкополочных листовых деталей с продольной кривизной

Рис. 2. Виды изготавливаемых деталей с продольной кривизной в роликах: а – бампер автомобиля ВАЗ-06; б – профиль дорожного ограждения; в – бампер автомобиля ВАЗ-07; г – кольцевая деталь типа «обруч упаковочный»

Рис. 3. График для определения предельного радиуса изгиба детали: 1 – деформация периферийных волокон полки, находящейся вне плоскостигиба; 2 – 7 – критические деформации при $R = 3; 4; 5; 6; 7$ и 8 м соответственно

Рис. 4. Дефекты, возникающие при гибке профиля по контуру: а – кромковая волнистость; б – местная потеря устойчивости и разрыв заготовки по угловой зоне

Рис. 5. Деформации полки, подверженной кромковой волнистости: 1 – 5 – $f = 3; 4; 5; 6$ и 7 мм соответственно

Рис. 6. Раскатка полки в роликах: а – схема раскатки; б – раскатные ролики

Рис. 7. Исследование деформаций раскатываемой полки: а, б – методом сеток (до и после раскатки соответственно); в, г – методом отверстий (до и после раскатки соответственно)

Рис. 8. Оборудование для производства обруча упаковочного: а - профилировочный станок; б – раскатной станок